

双液滴在交流电场下的变形和相互作用*

陈晓东 胡国庆

(中国科学院力学研究所, 非线性国家重点实验室, 北京 100190)

摘要 双液滴在电场下的变形和相互作用直接决定电融合的成功与否。电场强度、初始液滴间距和电场频率是电融合现象中的关键因素。本文从理论分析和数值计算两个方面研究了交流电场下受限液滴在矩形截面微通道中的电流体力学特性。发现了不同电场强度和初始液滴间距下的五个分区, 并通过理论分析确定了各分区间的边界。进一步揭示了液滴间液桥和泰勒锥在交流电场下的形成和演变规律。

关键词: 电融合、微流控、液滴、交流电场、泰勒锥。

液滴融合是液滴微流控装置的基本功能之一, 可用于精确控制试剂的混合^[1]。电场是广泛用于触发液滴融合的主动控制技术。两个液滴在电场中极化后, 会在互相靠近的界面上产生介电泳力。这样靠近的界面相互吸引, 变形并相互靠近, 最终可在电场的作用下合并。这个由电场引起的融合过程通常称为电融合^[2, 3]。本文考虑交流电场下受限液滴在矩形截面微通道中的电融合现象。

图 1(a)显示了两个液滴在微通道中沿着中心线移动, 同时沿着通道方向施加交流电压, 产生均匀分布的电场。电压在一个周期内的变化如图 1(b)所示。由于电场下液滴间总是产生吸引力, 有效电场强度应呈现如图 1(b)所示的脉动式变化。

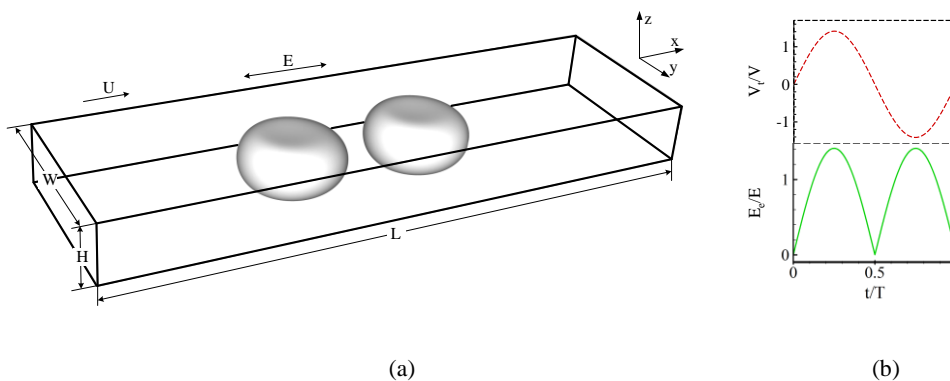


图1 (a) 双液滴在微通道中运动的原理图; (b) 交流电场下电压和有效电场强度的变化规律。

对液滴在电场下变形和靠近的过程的理解有助于精确控制液滴融合。在现有理论的基础上^[4, 5], 建立理论模型, 分析受限液滴的变形动态过程。图 2(a)显示了直流电场下液滴的变形情况。电场强度小于临界强度时, 液滴产生一定变形后即位置在该状态; 而

*国家自然科学基金项目(11272321 和 11402274)资助。

当电场强度大于临界强度时，液滴变形呈现指数型变化趋势。图 2(b)为一定频率下交流电场中液滴的变形过程。总体趋势与直流电场类似，但存在由交流电场引起的波动。理论分析发现：临界电场强度与电场频率无关，但交流电场下电融合所需要的时间较直流电场多。图 2(c)显示了电场强度同样而频率不同的各种情况下的电融合过程，电融合所需的时间随频率的增加而增加。图 2(b)进一步显示了融合所需时间随电场频率的变化规律。当电场频率高于 5 kHz 时，所需的时间基本不再变化。

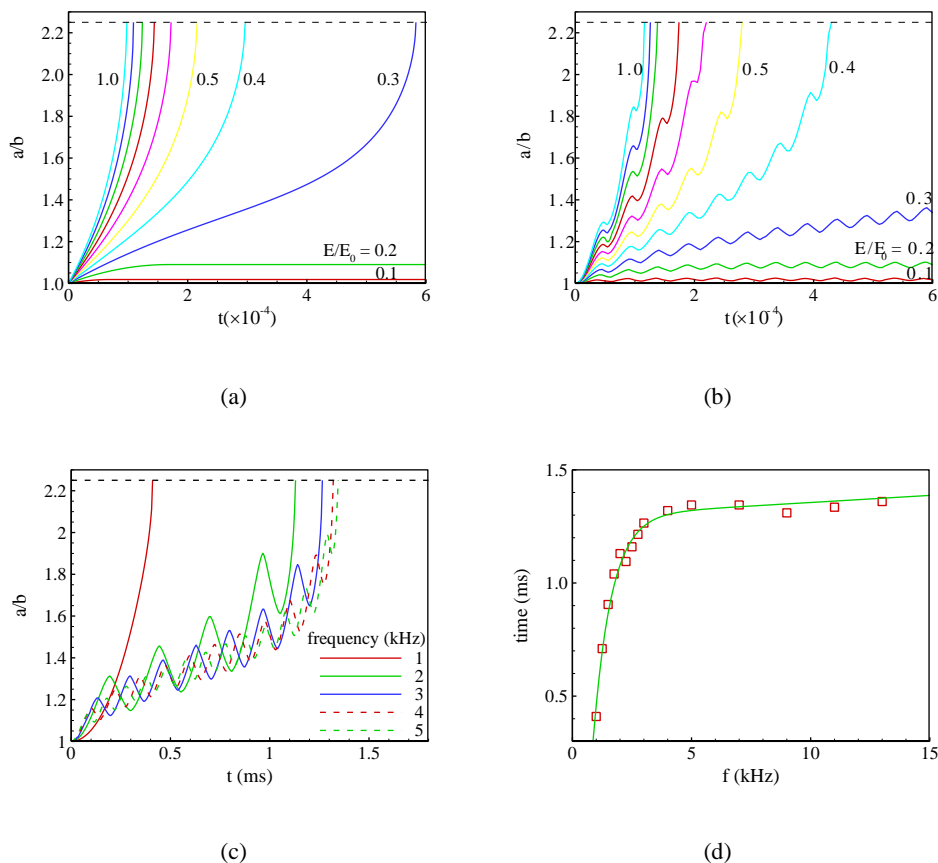


图2 (a) 双液滴在为通道中运动的原理图; (b) 交流电场下电压和有效电场强度的变化规律。

采用流体体积法和漏电介质模型结合的方法^[6, 7]，本文进行了全面的直接数值模拟，对上述模型进行验证，并深入分析电融合过程中涉及到的电流体动力流特征。通过对 32 个算例的模拟，得到了各种液滴间距和电场强度下的 5 种液滴相互作用现象，分别为不融合、融合、部分融合、融合后喷射、部分融合同时喷射，其中后两种为首次报道。各现象的液滴相互作用和变形过程如图 3(a)到(e)所示。理论分析发现，5 个区域可以使用三个边界来划分。理论边界与数值模拟结果吻合，如图 3(f)所示。进一步发现，液滴间的液桥是在表面张力作用下的液桥变细和交流电场作用下的液滴喷射的两个现象的交替变化中持续存在。

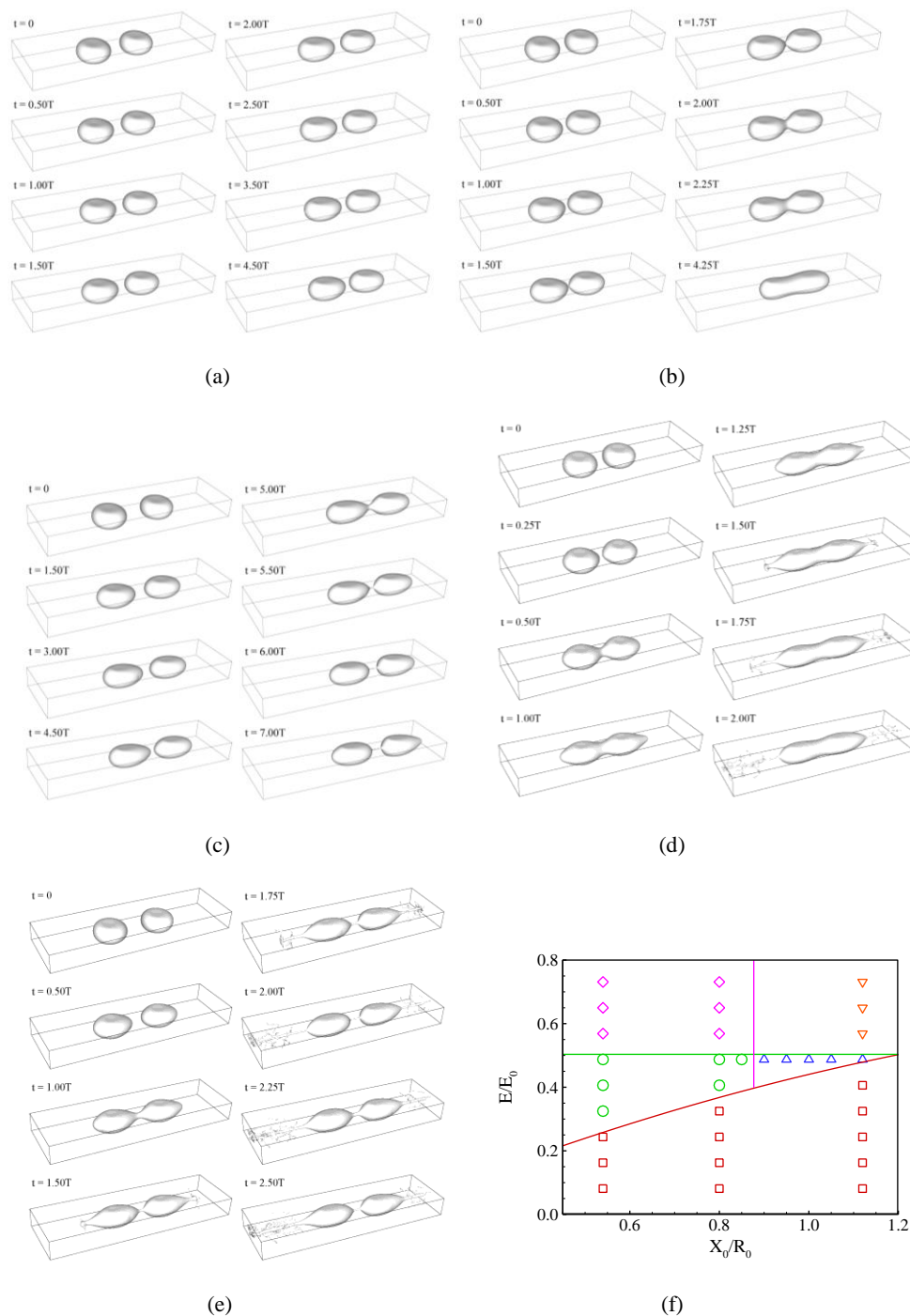


图3 (a)不融合($E/E_0 = 0.32$, $X_0/R_0 = 0.80$); (b)融合($E/E_0 = 0.41$, $X_0/R_0 = 0.54$); (c)部分融合($E/E_0 = 0.49$, $X_0/R_0 = 1.12$); (d)融合后喷射($E/E_0 = 0.65$, $X_0/R_0 = 0.54$); (e)部分融合同时喷射($E/E_0 = 0.65$, $X_0/R_0 = 1.12$); (f)双液滴相互作用的分区图, 五个区域分别为: 不融合(□)、融合(○)、部分融合(△)、融合后喷射(◇)、部分融合同时喷射(▽)。

参 考 文 献

1. Theberge, A.B., et al., Microdroplets in microfluidics: an evolving platform for discoveries in chemistry and biology. *Angewandte Chemie International Edition*, 2010. 49(34): p. 5846-5868.
2. Eow, J.S. and M. Ghadiri, Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology. *Chemical Engineering Journal*, 2002. 85(2): p. 357-368.
3. Eow, J.S., et al., Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding. *Chemical engineering journal*, 2001. 84(3): p. 173-192.
4. Taylor, G., Disintegration of water drops in an electric field. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1964. 280(1382): p. 383-397.
5. Latham, J. and I. Roxburgh, Disintegration of pairs of water drops in an electric field. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1966. 295(1440): p. 84-97.
6. Popinet, S., An accurate adaptive solver for surface-tension-driven interfacial flows. *Journal of Computational Physics*, 2009. 228(16): p. 5838-5866.
7. López-Herrera, J.M., S. Popinet, and M.A. Herrada, A charge-conservative approach for simulating electrohydrodynamic two-phase flows using volume-of-fluid. *Journal of Computational Physics*, 2011. 230(5): p. 1939-1955.